

土中における生分解性ドレーン材の物性変化

○飯塚浩延¹・田口博文²・田中卓也³・岡部有利子⁴・水野健太⁵・鈴木俊治⁶

¹チカミミルテック株式会社・²東亜建設工業株式会社・³東急建設株式会社

⁴みらい建設工業株式会社・⁵若築建設株式会社・⁶キャドテック株式会社

1. はじめに

近年、バーチカルドレーン工法およびバーチカルドレーンを用いた真空圧密工法を用いた軟弱地盤改良工事において、図-1に示すように生分解性ドレーン材の使用実績が増加している。しかしながら、生分解性ドレーン材の土中における分解の進行や劣化速度については詳しく分かっていない。そこで生分解性ドレーン材の土中における物性変化を確認する事を目的に、各種土壌環境を人工的に作製し埋設暴露実験を実施した。本稿では実験概要および4材令（3カ月、6ヶ月、1年、2年）に対する評価試験結果について報告する。また海水暴露したケースについても報告する。

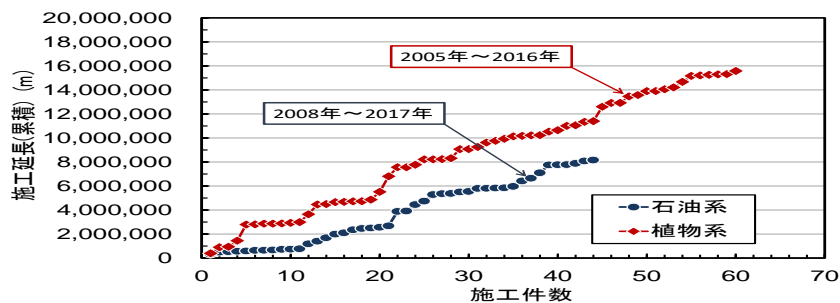


図-1 鉛直ドレーン材の施工作件数と施工延長の関係（ジオドレーン協会工法の実績）

2. 生分解性ドレーン材の概要

生分解性ドレーン材とは、自然条件下で分解され自然に還るプラスチックドレーンである。鉛直ドレーン材と水平ドレーン材がある。これらはトウモロコシから抽出される「デンプン」を原料として生成される「ポリ乳酸」を主原料としており、水と微生物の働きにより最終的には炭酸ガスと水に分解される。その他の植物系ドレーン材との比較を表-1に示す。バーチカルドレーン工法の一つであるジオドレーン工法¹⁾で使用する生分解性ドレーン材は、芯材およびフィルターも含めて生分解性材料であることが特徴であり、グリーンプラ登録製品となっている。

表-1 植物系ドレーン材（鉛直ドレーン）の比較

名称		生分解性	バイオマス樹脂	天然繊維
芯材		生分解性樹脂	バイオマス樹脂 (資源米:30～50%)	ヤシ繊維
フィルター		生分解性 不織布	ポリエステル系 合成繊維	ケナフ繊維
寸法	厚(mm)	3.3±0.5	3.6±0.5	9.0±1.5
	幅(mm)	98.5±5.0	94.0±2.0	90.0±15.0
透水係数	鉛直(m/s)	1.0×10 ⁻² 以上 (350kPa)	1.0×10 ⁻² 以上	1.0×10 ⁻⁴ 以上 (200kPa)
	水平(m/s) (フィルター)	1.0×10 ⁻⁴ 以上	1.0×10 ⁻⁴ 以上	—
引張強度		(kN/製品幅) 2.0以上	2.0以上	5.0以上

ジオドレーン工法で使用する生分解性ドレーン材のうち、鉛直ドレーン材については、現場において生分解性の追跡調査が実施されている。図-2は現場から採取した生分解性鉛直ドレーン材の埋設期間と引張強度の関係と、ドレーン材の原材料であるスパンボンド、フィルムの時間と引張強度保持率（劣化特性）の関係を示したものがある。概ね材令2年までの実測に基づく生分解完了の時期は約6年2カ月後と予測されている。ただし、この結果は限定的なデータ（現状2年以上放置した実測例はない）に基づく線形外挿計算によるものであり、地中深くに設置された鉛直ドレーン材の生分解性や土壌の種類や含水比の影響等に関しては、いまだ不明な点が多いことに留意する必要がある。

Changes in physical properties of biodegradable drain materials in soil

Hironobu Iitsuka¹, Hirofumi Taguchi², Takuya Tanaka³, Yuriko Okabe⁴, Kenta Mizuno⁵, Toshiharu Suzuki⁶ (¹Chikami Miltec INC, ²Toa Corporation, ³Tokyu Construction Co., LTD, ⁴Mirai Construction Co., LTD, ⁵Wakachiku Construction Co., LTD, ⁶Cadtech INC,)

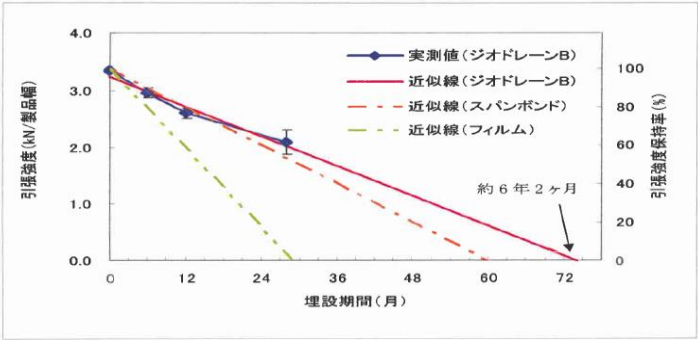


図-2 生分解性鉛直ドレーン材の生分解性予測

3. 実験概要

3.1 土壌環境

(1) 対象土の選定

各種ドレーン材を埋設する土壌環境として、①微生物を多く含む有機質土、②サンドマットあるいは足場材を想定した砂質土（山砂）、③改良対象層を想定した粘性土（浚渫土）を選定した。土壌環境一覧を表-2 に示す。

表-2 土壌環境の種類

種類	産地（採取地）	備考
有機質土	神奈川県伊勢原市	掘削土
砂質土	千葉県市原市	山砂
粘性土	千葉県市川市	浚渫土

(2) 土質特性

土壌の物理・化学試験結果を表-3 に、粒径加積曲線を図-3 に、生菌数測定（CFU 法）による微生物（細菌、放射菌、カビ）の含有量を図-4 に示す。

表-3 土壌の物理・化学試験結果

試料名			有機質土	山砂	粘性土	試料名			有機質土	山砂	粘性土
産地			伊勢原	市原	市川	産地			伊勢原	市原	市川
項目	記号	単位				項目	記号	単位			
土粒子の密度	ρ_s	g/cm ³	2.630	2.676	2.622	分類名			砂礫質細粒土	細粒分まじり砂	礫まじり砂質細粒土
自然含水比	wn	%	68.2	5.9	21.9	分類記号			(FSG)	(S-F)	(FS-G)
石分	(75mm以上)	%	0.0	0.0	0.0	土懸濁液pH	pH		6.9	8.1	8.0
礫分	(2~75mm)	%	16.7	0.9	7.2	強熱減量	Li	%	13.0	2.5	5.6
砂分	(0.075~2mm)	%	22.3	87.4	41.7	細菌	希釈平板法(好気)	cfu/g	1.6E+07	2.1E+05	1.4E+07
シルト分	(0.005~0.075mm)	%	36.5	8.0	29.7	放線菌	希釈平板法(好気)	cfu/g	9.7E+04	4.0E+02	6.0E+05
粘土分	(0.005mm未満)	%	24.5	3.7	21.4	カビ	希釈平板法(好気)	cfu/g	2.3E+03	3.3E+01	2.0E+02
細粒分含有率	Fc	%	61.0	11.7	51.1						
最大粒度	Dmax	mm	19.00	4.75	19.00						
60%粒径	D60	mm	0.0725	0.2321	0.1263						
50%粒径	D50	mm	0.0502	0.1968	0.0697						
30%粒径	D30	mm	0.0112	0.1401	0.0142						
20%粒径	D20	mm	0.0012	0.1123	0.0038						
10%粒径	D10	mm	-	0.0608	-						
均等係数	Uc(D60/D10)		-	3.82	-						

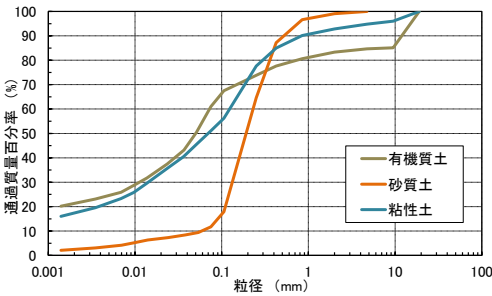


図-3 土壌の粒径加積曲線

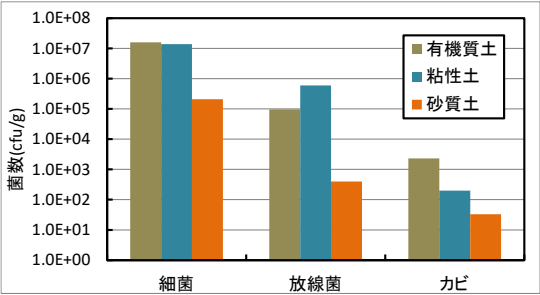


図-4 微生物含有量

3.2 埋設供試体

埋設供試体の種類と対応する評価試験を表-4に示す。埋設供試体は、製造元から搬入されたロール状の各ドレーン材を以下の手順で準備した。なお水平ドレーン材3種は、評価試験用として幅100mmのものを使用した。なお新BSBドレーンとは、従来のBSBドレーンに対して原料品番を変えたものである。

- ① 評価試験種ごとに指定された長さに切断。
- ② 切断部（端部）からの土砂・間隙水の侵入を防止するために、切断面はビニールテープ養生する。
- ③ ビニールテープは色分けし、油性マジックで試験片Noを記入。
- ④ 各試験片の初期重量を計測し、結果はドレーン管理表に記入。
- ⑤ 初期状態の写真撮影を行う。
- ⑥ 埋設までの間は密閉容器で保管。

3.3 実験ケース（暴露ケース）

実験ケースを表-5に示す。3種類の土壌環境に対して、有機質土については含水状態を高含水比と低含水比の2ケースとし、計4ケースの設定とした。この他に海水暴露を1ケース設定した。ドレーン材は生分解性の鉛直ドレーンと水平ドレーン、また比較のための石油系鉛直ドレーンと水平ドレーンを用いた。

表-4 埋設供試体の種類と評価試験

分類	印	材料名称	評価試験	幅	長さ	数量（ケース×材令×検体数）
植物系 （生分解性）	鉛直	ノーナルドレーン（ND）	透水	98.5mm	220mm	4×5×3=60
			引張		400mm	4×5×3=60
	水平	BSBドレーン（BSB）	透水	100mm	220mm	4×5×3=60
			耐圧	（試験用）100mm	4×5×3=60	
	水平	新BSBドレーン（BSB2）	透水	100mm	220mm	4×5×3=60
			耐圧	（試験用）100mm	4×5×3=60	
石油系	鉛直	ジオドレーン（GD）	透水	98.5mm	220mm	4×2×3=24
			引張		400mm	4×2×3=24
	水平	SBドレーン（SB）	透水	100mm	220mm	4×2×3=24
			耐圧	（試験用）100mm	4×2×3=24	

表-5 実験ケース

Case No.	土 壌	含水状態	鉛直ドレーン		水平ドレーン			材 令
			石油系	植物系	石油系	植物系		
			GD	ND	SB	BSB	新BSB	
1	有機土	高含水比 wn=90～100%	—	○	—	○	○	5材令
			○	—	○	—	—	2材令
2		低含水比 wn=60～80%	—	○	—	○	○	5材令
			○	—	○	—	—	2材令
3	山砂	wn=30～35%	—	○	—	○	○	5材令
			○	—	○	—	—	2材令
4	粘性土	wn=30～35%	—	○	—	○	○	5材令
			○	—	○	—	—	2材令

3.4 実験手順

埋設したドレーン材を容易に掘り起こし、暴露する土壌環境の外的要因（紫外線、降雨、地下水等）によるばらつきを最小限にするため、屋内に設置した大型樹脂製容器に人工的な土壌環境を模擬した。

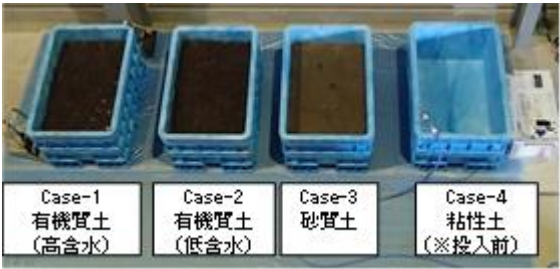


写真-1 暴露土槽の外観（埋設後）

- ① 容量300Lの大型樹脂製容器に採取した土壌を均一に投入する。ここで1ケースに対して大型樹脂製容器を1つ使用するため、鉛直ドレーンと水平ドレーンは同一の大型樹脂製容器内に暴露されることになる。
- ② 供試体を土壌の上に敷きならべ、覆土する。敷設方法を図-5に示す。ここで所定期間後に掘り起こすことを想定し、材令の長いものから順に敷きならべる。すなわち土壌と供試体を10層に分けてミルフィーユ状に仕上げていく。奇数層は引張試験・耐圧試験用に、偶数層は透水試験用とする。
- ③ 所定期間養生する。
- ④ 土壌環境の初期値を計測する。養生期間中は含水比を2~4回/月程度の頻度で計測し、初期含水比を維持するよう適宜散水する。
- ⑤ 所定の養生期間が経過したのち、埋設供試体を慎重に掘り起こす。掘り起こしたドレーン材は水洗いした後に乾かし、外観の観察・写真撮影を行う。
- ⑥ 引張試験・耐圧試験・透水試験用に供試体は密閉袋に梱包し、試験場所に発送する。

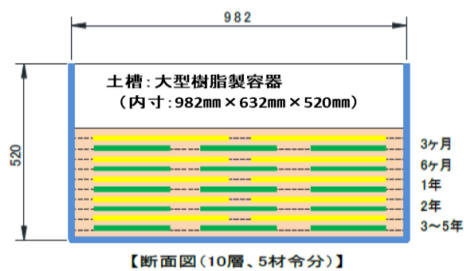


図-5 暴露土槽の概要（試験供試体の敷設方法）

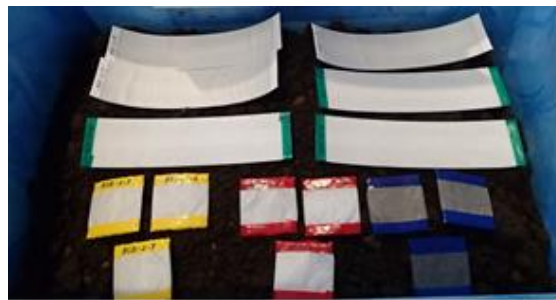


写真-2 供試体の埋設状況（敷設後、土壌投入前）

3.5 評価試験

(1) 引張試験

供試体（鉛直ドレーン材、 $L=400$ mm）の引張試験（化学物質評価研究機構法に準拠）を実施する。試験条件はチャック間距離 250 mm、載荷速度 500 mm/min とし、荷重の最大値 (kN) とその時の伸び (mm)、破断時の伸び (mm) を記録し、3 供試体の平均値を評価値とする。引張試験状況を写真-3 に示す。

(2) 圧縮試験

供試体（水平ドレーン材、100 mm×100 mm）の芯材に対して圧縮試験（JIS K 6911-2006 に準拠）を実施する。上下載荷板（ $\phi 5$ cm）の間に芯材を挟み載荷板で荷重を負荷（載荷速度 10 mm/min）し、その最大値より圧縮強度 (N/cm²) を算出する。結果は 3 供試体の平均値を評価値とする。圧縮試験状況を写真-4 に示す。



写真-3 引張試験の状況



写真-4 圧縮試験の状況

(3) 透水試験（面内通水試験）

面内通水試験はプラスチックボードドレーン工法研究会（PBD工法研究会）²⁾が提案したもので実施する。三軸セルを用いることで現場状況に即した拘束圧および軸ひずみを試験片に与えることができる、現在一般的に採用されている試験方法である。

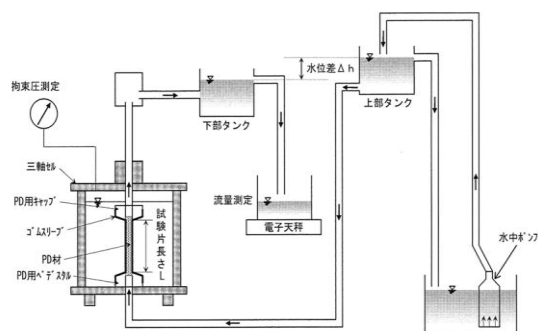


図-6 面内通水試験システムの概要



写真-5 透水試験の状況

透水試験用供試体にゴムスリーブを被せ、拘束圧（セル圧）と載荷後一定動水勾配における一定時間あたりの通水量を測定し、透水係数を次式により求める。通常は軸ひずみ 0 % の場合で行っている。

$$k = Q / (i \cdot A) \cdot \eta_t$$

ここに、 k : 透水係数 (cm/sec)、 Q : 通水量 (cm³/sec)、 A : ドレーン材の断面積 (cm²)、 i : 動水勾配 ($=H/L$)、 L : ドレーン長 (cm)、 η_t : 温度 15°C に対する補正係数である。

4. 実験結果

4.1 供試体の掘り起こし状況

生分解性ドレーン材について、供試体の掘り起こし状況を写真-6に示す。ここで、埋設期間3か月、2年の供試体はいずれも水洗い前の状況である。いずれのケース、材令においても、目視では埋設供試体（芯材、フィルター）が劣化あるいは分解している様子は見受けられず、掘り起こし作業も容易であった。ただし、埋設前と比較するとやや弾力が失われ硬直化していた。

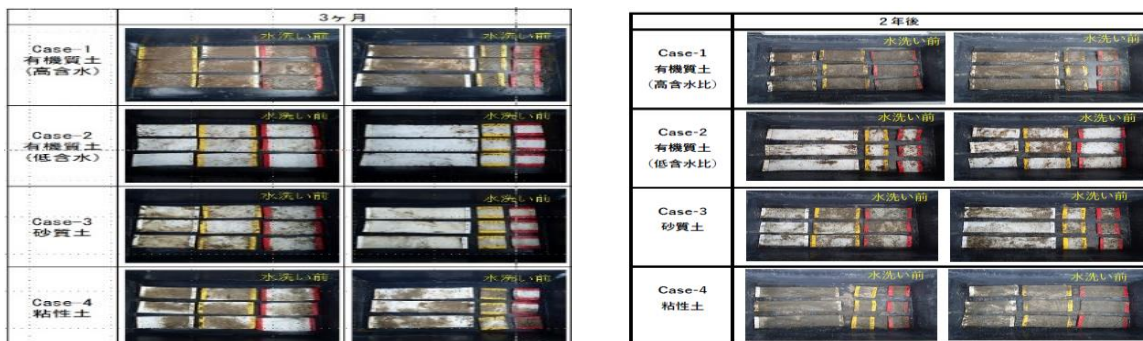


写真-6 試験供試体の掘り起こし状況（生分解性ドレーン材）

4.2 引張試験結果

鉛直ドレーン材を対象にした引張試験結果を図-7に示す。ここで、各グラフは3供試体の平均値をプロットしている。図よりケース（土壌環境）毎の明確な相違は見出せないが、生分解性ドレーン材（ND）はCase-3（砂質土）を除き、材令6か月以降の引張強度は低下傾向を示しており、材料の劣化が僅かではあるが進行しているものと思われる。

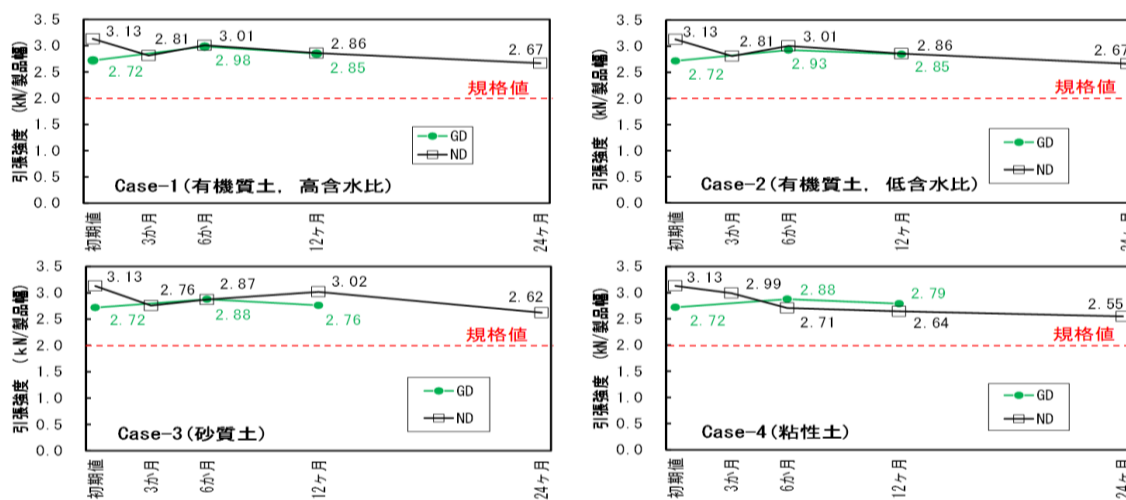


図-7 引張強度の経時変化（鉛直ドレーン材）

材令2年（24カ月）の引張強度は2.55～2.67kN/製品幅であり、初期強度（3.13kN/製品幅）の81～85%に強度低下していることがわかった。なお材令2年においても、鉛直ドレーン材の品質規格値（引張強度>2.0kN/製品幅）を満足しているレベルである。土中暴露の材令2年以降の引張強度がどの程度劣化するかについて、引き続きモニタリングする必要があると考えられる。

海水暴露による引張強度の経時変化を図-8に示す。海水暴露の材令3年の引張強度は2.39kN/製品幅であり、初期強度の76%に強度低下している。このことから、生分解性鉛直ドレーン材は、海中でも強度劣化が進行することがわかる。

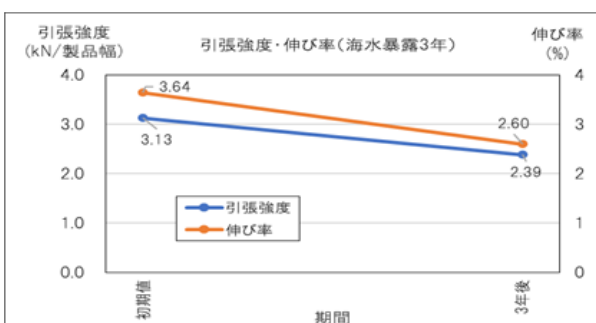


図-8 海水暴露による引張強度の経時変化（生分解性鉛直ドレーン材：ND）

4.3 圧縮試験結果

水平ドレーン材を対象にした圧縮試験結果を図-9に示す。各グラフは3供試体の平均値をプロットしている。試験により算出される圧縮強度は、上載荷重（盛土）に対する強さの指標となる（圧縮強度が大きければより大きな荷重に耐えられる）。図より引張試験と同様にケース（土壌環境）毎の明確な相違は見出せなかった。

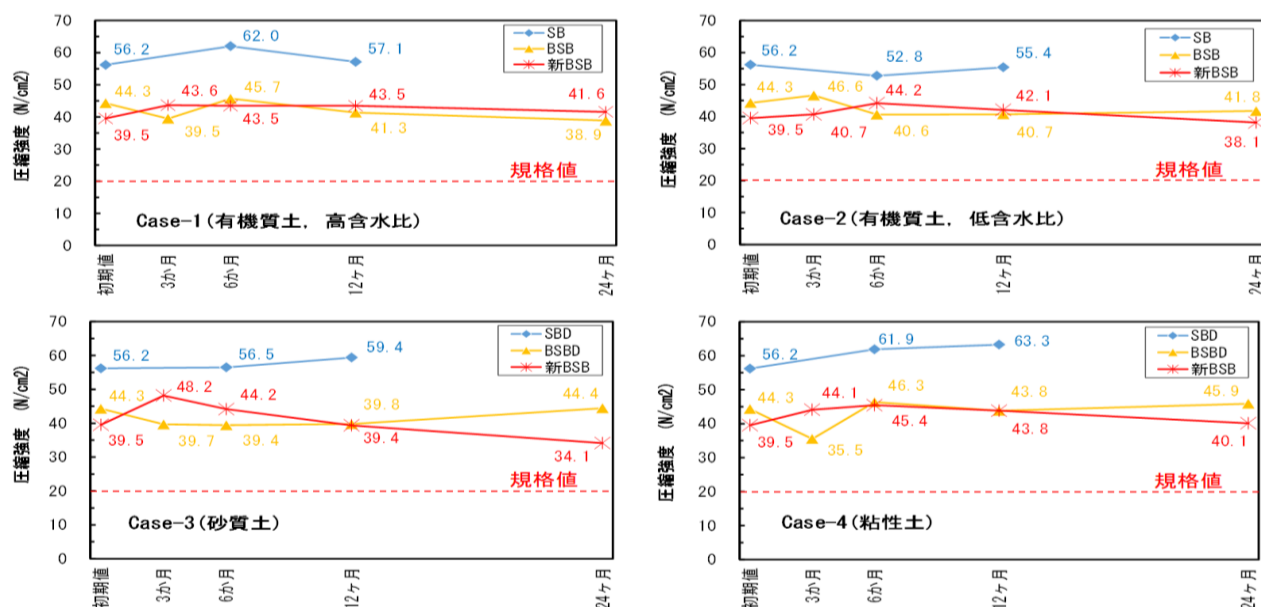


図-9 圧縮強度の経時変化（水平ドレーン材）

生分解性水平ドレーン材（BSB、新 BSB）は石油系水平ドレーン材（SB）よりも初期強度が小さい。BSB は材令の進行に伴う強度変化は小さいが、新 BSB は3 カ月あるいは6 カ月以降に圧縮強度は低下傾向を示しており、BSB と比較すると劣化速度が速い傾向を示している。材令1年および2年の供試体において、試験中に芯材の割れが発生していた。したがって、いずれの生分解性ドレーン材も土壌中で材料劣化していることは間違いないと思われる。なお、材令2年の圧縮強度は Case-3（砂質土）を除くと初期強度とほぼ等しくし、水平ドレーン材の品質規格値（圧縮強度 $>20\text{N/cm}^2$ ）を満足しているレベルである。材令2年以降の強度が初期強度を下回るかどうかは、引張試験と同様に残りの埋設供試体（材令3～5年用）で確認する必要があると考えられる。

海水暴露による圧縮強度の経時変化を図-10に示す。海水暴露の材令3年の圧縮強度は $37.39\sim40.60\text{kN/cm}^2$ であり、初期強度の91～94%となっている。品質規格値は十分満たしている。

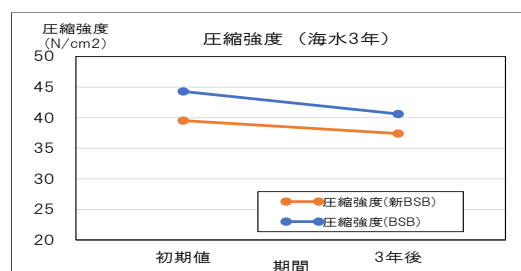


図-10 海水暴露による圧縮強度の経時変化（生分解性水平ドレーン材）

4.4 透水試験結果

生分解性ドレーン材（鉛直および水平）に対する透水試験（面内通水試験）の結果を図-11～図-13に示す。ここでグラフは3供試体の平均値をプロットしている。横軸は試験時の拘束圧、縦軸は面内透水係数（ k ）であり、鉛直ドレーン材に対する品質規格値は $k>1\times10^{-2}\text{m/sec}$ （拘束圧 350kPa ）、水平ドレーン材に対する品質規格値は $k>5\times10^{-2}\text{m/sec}$ （拘束圧 100kPa ）である。図-11より生分解性鉛直ドレーン材は材令12カ月までは透水係数の変化はほとんどないが、材令24カ月においては拘束圧 350kPa の場合に透水係数が低下していることがわかる。ただし、この条件においても透水係数の品質規格値（ $k>1\times10^{-2}\text{m/sec}$ ）を満足しているため、ドレーン性能に支障があるレベルではないと考えられる。

一方、図-12および図-13に示した生分解性水平ドレーンに対する拘束圧 100kPa の場合は、材令12カ月においては品質規格値（ $k>5\times10^{-2}\text{m/sec}$ ）を満足しているものの、材令24カ月においてはケースによっては品質規格値を下回る結果となった。透水係数が低下した要因としては、材料劣化に伴い高拘束圧作用時に水平ドレーン材が押しつぶされやすくなり、通水面積が減少し通水量が低下したためと考えられる。

鉛直材と水平材でフィルター材は同じであるが、芯材は加工方法や原料が異なっている。いずれも生分解性材料であるが、この違いが上記のような結果差を生じさせていると考えられる。

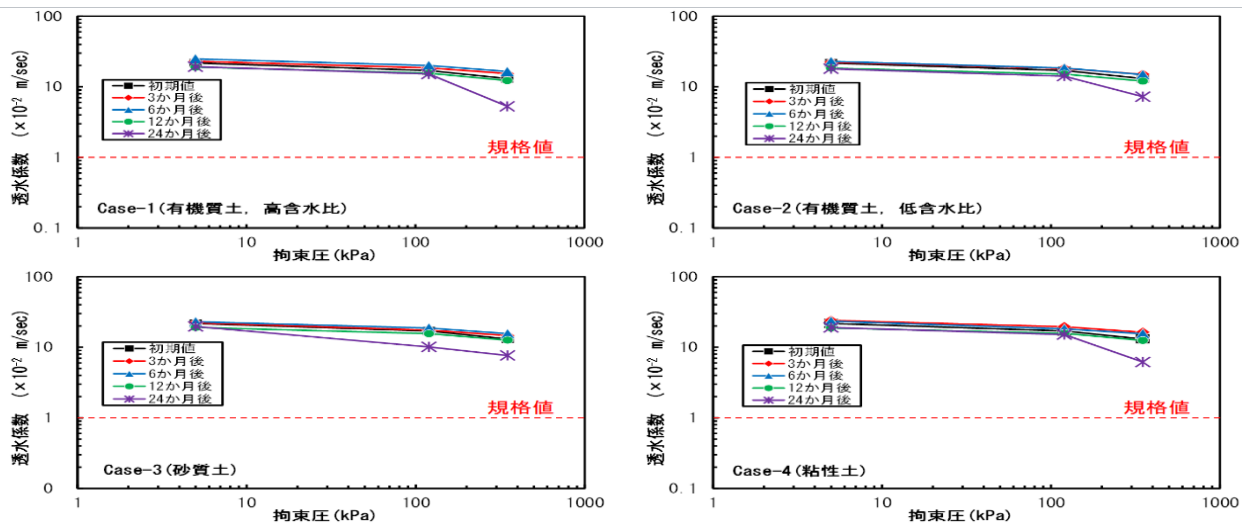


図-11 透水試験結果 (生分解性鉛直ドレーン : ND)

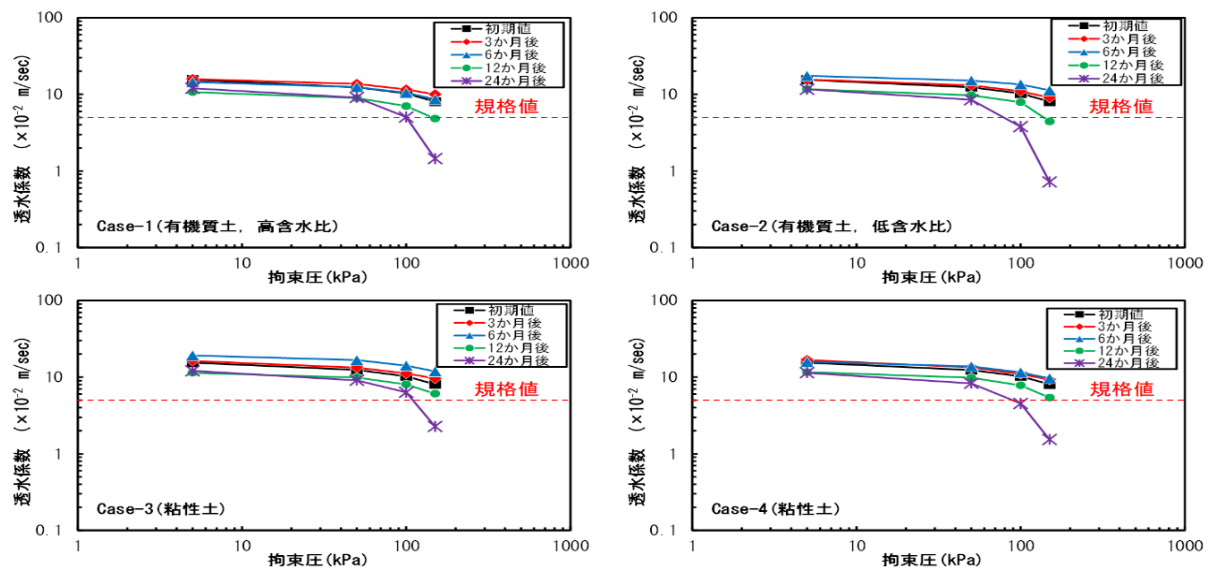


図-12 透水試験結果 (生分解性水平ドレーン : BSB)

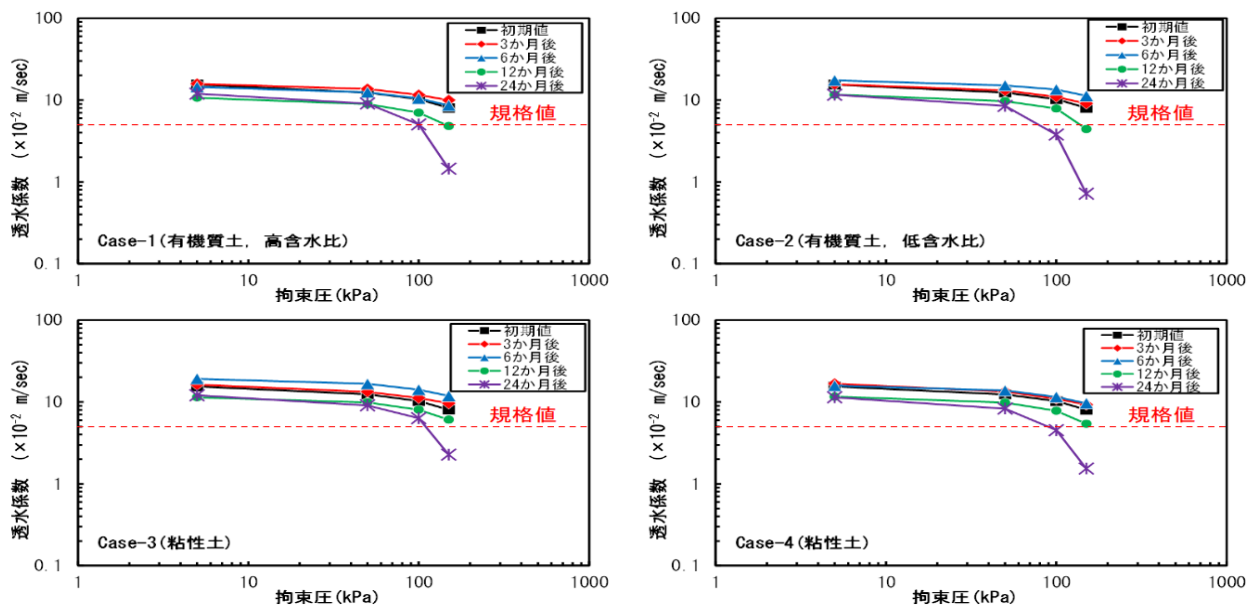


図-13 透水試験結果 (生分解性水平ドレーン : 新 BSB)

海水暴露供試体の透水試験変化を図-14 に示す。海水暴露の材令 3 年の透水試験結果より、生分解性鉛直ドレーンおよび生分解性水平ドレーンともに製品規格値を満たしていることがわかる。

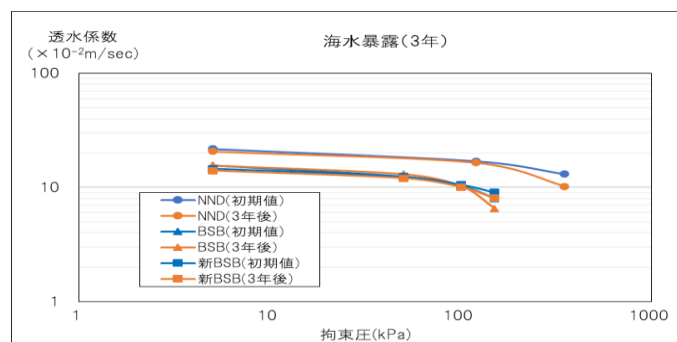


図-14 海水暴露による透水試験結果（生分解性ドレーン材）

5. 結論

本実験から現段階（土中暴露材令 2 年、海中暴露材令 3 年まで）において得られた知見を以下に示す。

- 1) 埋設された生分解性ドレーン材は、目視で見た限りでは劣化や分解している様子は確認できなかった。また土壌環境による材料変化に明確な相違は見出せなかった。
- 2) 生分解性鉛直ドレーンは土中暴露材令 6 カ月以降に引張強度は低下傾向を示し、初期強度の 81～85%（2.55～2.67kN/材料幅）となった。ただし品質規格値（2.0kN/材料幅）は十分に満足しており、鉛直ドレーン材としての機能は果たしているものと考えられる。海中暴露材令 3 年においても、品質規格値を満たしている。
- 3) 生分解性水平ドレーンは、土中暴露材令 1 年以降では圧縮試験中に芯材の割れが生じたため、土壌環境下では材料劣化が進行するものと判断できる。海中暴露材令 3 年では、初期強度の 91～94%に強度低下していた。ただし、いずれの水平ドレーン材も圧縮強度は品質規格値（20kN/cm²）を十分満足するものであった。
- 4) 生分解性鉛直ドレーンは材令 24 カ月において高拘束圧時（350kPa）の透水係数が低下したが、品質規格値（ 1×10^{-2} m/sec）は十分に満足していた。しかし生分解性水平ドレーンは材令 24 カ月において、高拘束圧時（100kPa）の透水係数が低下し品質規格値（ 5×10^{-2} m/sec）を下回るケースもあった。
- 5) 以上の評価試験の結果から、材令 2 年においても生分解性鉛直ドレーンは品質規格値を満足できる。一方生分解性水平ドレーンは材令 2 年において高拘束圧時(100kPa)の透水係数が低下し、品質規格値を下回るケースもあった。しかしプラスチックドレーンを用いたバーチカルドレーン工法では圧密の進行とともに排水量は減少していくため、設計実務的には対応可能であると考えられる。

6. 今後の課題

埋設供試体は生分解性ドレーン材に関して、各評価試験用に 3 供試体ずつ暴露中である。これについては、長期材令（例えば 3 年や 5 年）で掘り起こし、同様の評価試験を実施する予定である。また、屋外ヤード（埋設日：2016 年 7 月 15 日、種類：全ドレーン、各 3 供試体）においても暴露中であり、時期を見て掘り起こしと評価試験を実施する予定である。

謝辞

本研究は、ジオドレーン協会・ジオドレーン工法部会で実施した共同実験成果をまとめたものである。関係各位に紙面を借りて感謝いたします。

参考文献

- 1) ジオドレーン工法：ジオドレーン協会（<http://geo-drain.com/index.html>）
- 2) プラスチックボードドレーン工法 その理論と実際：プラスチックドレーン工法研究会